

学校编码: 10384  
学号: 18120051301666

分类号\_\_密级\_\_  
UDC\_\_

廈門大學

碩 士 学 位 论 文

## 回廊模微腔器件的熔锥耦合实验研究

**Experimental Studies on Micro-resonator with  
Whispering-gallery Modes Coupled by Tapered Fiber**

马 乐

指导教师姓名: 蔡志平 教授/博导

专 业 名 称: 光 学

论文提交日期:

论文答辩时间:

学位授予日期:

答辩委员会主席: \_\_

评阅人: \_\_

2008 年 5 月

A Dissertation Submitted for Master Degree of  
Philosophy at Xiamen University

Experimental Studies on Micro-resonator with  
Whispering-gallery Modes Coupled by Tapered Fiber

**Ma Le**

**Supervisor Prof. Cai Zhiping**

Department of Physics

Xiamen University

May, 2008

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

# 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在          年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名：

日期：          年    月    日

导师签名：

日期：          年    月    日

厦门大学博硕士论文摘要库

## 摘要

近年来,光子学微结构中的柱/碟、环/线、球等几何微腔已在微腔激光器件和光谱技术应用中取得重大进展。本文将熔锥光纤与球/柱微腔作为一个有机的整体进行耦合实验研究,发现了吸收光谱中等间距的分立的结构共振峰,并且进一步对共振峰的特点进行了实验研究。

我们首先回顾了近年来球/柱微腔特性的研究状况和微腔耦合器的近期发展,并对微腔的应用情况进行简要介绍。

其次,我们从理论的角度出发,利用 Mie 散射理论得到了球微腔内外的电磁场分布,分析了球微腔的有关特性,再把球微腔的相关理论近似应用在柱微腔的分析中,对实验的开展有非常重要的指导意义。接着对熔锥光纤的理论进行探讨,从一般光纤的场解入手,推导出弱导光纤和熔锥光纤锥腰的场解。

然后根据微球与熔锥光纤场模的分布构造了微球与熔锥光纤的耦合系统,从场传输耦合方程推导了耦合系统的透射率。讨论了球微腔与熔锥光纤的间距等因素对耦合系统的透射率的影响。并分析了耦合系统的三种耦合情形:欠耦合、临界耦合、过耦合。

再次,我们设计了 CO<sub>2</sub> 激光熔融与拉制熔锥光纤的系统,制备了实验需要的熔锥光纤,将系统进行扩展,制备了石英球/柱微腔。将上海光机所提供的掺铒磷酸盐玻璃进行高温熔融抽丝,选择直径适当的玻璃丝进行断面处理,再利用扩展的系统烧制出掺铒玻璃球微腔。

最后,我们搭建了耦合实验需要的平台,先将石英球微腔与熔锥光纤进行耦合,发现了明显的回廊模式结构共振峰,并对共振峰的模式分裂现象进行了研究。然后详细的介绍了掺铒磷酸盐玻璃球微腔与熔锥光纤耦合实验,对其吸收光谱上结构共振峰的波长、峰间间距以及光反馈进行研究。同时,对柱微腔与熔锥光纤的耦合系统进行了实验研究。

本论文工作得到国家自然科学基金资助,项目名称:“稀土掺杂氟化物玻璃球微腔激光器”,项目编号:60277026。

**关键词:** 回廊模; 微腔; 熔锥光纤

厦门大学博硕士论文摘要库



## Abstract

In recent years, optical microcavities such as microcylinder, microdisk, microring, microsphere have been greatly developed in microcavity laser and spectrum technology. In this thesis, the microsphere/microcylinder and the tapered fiber coupling system, are regarded as the object of study. The discrete structural resonance in the silica microsphere/microcylinder and glass microsphere doped by  $\text{Er}^{3+}$  is experimentally observed. Then we studied more about the characteristics of the resonance.

This thesis consists of the following five parts of work.

Firstly, we had a brief review on the history of microsphere/microcylinder resonance in theoretical and experimental studies. Then we introduced simply the applications of the microcavity.

Secondly, according to the Mie's scattering theory, the optical field in a microsphere has been obtained. The characteristics of the microspherical resonance and the biconical tapered fiber have been analyzed separately. The theory of microsphere has been approximately applied to the study of microcylinder. Then the field solution of biconical tapered fiber has been obtained.

Next, the coupling system between microsphere and tapered fiber has been analyzed theoretically. The transmission ratio of the coupling system and its dependence on the gap between microsphere and biconical tapered fiber have been discussed. The coupling system consists of critical coupling, excess coupling and deficient coupling.

And next, the  $\text{CO}_2$  laser system of drawing the biconical tapered fiber has been designed, and the biconical tapered fiber that we need has been made. Then we improved the system to fabricate silica microsphere/microcylinder. Using the  $\text{Er}^{3+}$ -doped phosphate bulk glass, the  $\text{Er}^{3+}$ -doped phosphate glass microsphere is fabricated by this  $\text{CO}_2$  laser system.

At last, the coupling system has been set up. The laser light is coupled into the silica microsphere by a biconical tapered fiber. The discrete structural resonance in the absorption spectra was observed, and then the splitting effects of the modes were analyzed. Then the coupling experiment of  $\text{Er}^{3+}$ -doped phosphate glass microsphere with biconical tapered fiber has been studied in detail. The measured wavelengths, the interval between the adjacent modes and the feedback have been compared with the

theoretical computation, and they are fair coincident with each other. Lastly, the coupling of microcylinder and biconical tapered fiber has been studied briefly.

The research of this dissertation is supported by National Natural Science Foundation of China, number 60277026.

**Keywords:** Whispering Gallery Modes; Micro-sphere/cylinder; Tapered fiber

厦门大学博硕士论文摘要库

# 目 录

第一章 绪论	1
§1.1 微腔及其耦合体系的研究历史	2
§1.2 球微腔、柱微腔的发展及应用	5
§1.2.1 腔体量子电动力学及低阈值激光器的应用	5
§1.2.2 极高灵敏度的运动传感器	6
§1.3 国内关于球/柱微腔的研究进展	7
§1.4 本文的结构安排	7
第二章 微腔器件及熔锥光纤的理论分析	9
§2.1 球微腔的理论特性	9
§2.1.1 球微腔的场解	10
§2.1.2 球微腔的特征方程	12
§2.1.3 球微腔的基本参数	13
§2.2 柱微腔的理论分析	18
§2.3 熔锥光纤传播特性	19
§2.3.1 光纤的特性	19
§2.3.2 弱导光纤的场解	20
§2.3.3 熔锥光纤及其场解	21
§2.4 本章小结	22
第三章 熔锥光纤和微腔的耦合系统分析	23
§3.1 系统品质因子 $Q$	23
§3.2 微腔与熔锥光纤的耦合系统分析	25
§3.2.1 耦合系统理论分析	25
§3.2.2 耦合系统参数分析	28
§3.3 本章小结	31
第四章 熔锥光纤和微腔的制备	33
§4.1 熔锥光纤的制备	33
§4.1.1 熔融拉锥方法的比较和选择	33

§4.1.2 CO <sub>2</sub> 激光熔拉系统结构与控制 .....	34
§4.1.3 实验操作情况与实验结果 .....	36
<b>§4.2 球/柱微腔的制备 .....</b>	<b>38</b>
§4.2.1 几种球微腔制备方法的对比 .....	38
§4.2.2 球微腔的制备 .....	39
§4.2.3 柱微腔的制备 .....	44
<b>§4.3 本章小结 .....</b>	<b>44</b>
<b>第五章 微腔吸收光谱上的形貌共振现象 .....</b>	<b>45</b>
<b>§5.1 石英玻璃球微腔吸收光谱上的形貌共振 .....</b>	<b>45</b>
§5.1.1 实验结构 .....	45
§5.1.2 实验结果与分析 .....	48
<b>§5.2 掺铒磷酸盐玻璃球微腔吸收光谱上的形貌共振 .....</b>	<b>50</b>
§5.2.1 掺铒磷酸盐玻璃的特性 .....	50
§5.2.2 掺铒磷酸盐玻璃球微腔的光谱特性 .....	53
<b>§5.3 石英玻璃柱微腔吸收光谱上的形貌共振 .....</b>	<b>59</b>
<b>§5.4 本章小结 .....</b>	<b>63</b>
<b>第六章 总结与展望 .....</b>	<b>64</b>
<b>§6.1 本文总结 .....</b>	<b>64</b>
§6.1.1 本文的创新点 .....	65
<b>§6.2 今后的研究工作展望 .....</b>	<b>66</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>67</b>
<b>硕士期间发表论文 .....</b>	<b>72</b>
<b>硕士期间获奖情况 .....</b>	<b>73</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>74</b>

# CONTENTS

<b>Chapter 1 Preface</b>	<b>1</b>
§1.1 History of Micro-cavity and its Coupled System with Tapered Fiber	2
§1.2 Development and Application of the Micro-cavity Resonance	5
§1.2.1 The Application of Cavity QED and Ultra-low Threshold Lasers	5
§1.2.2 Acceleration Sensors Based on High-Q Optical Microsphere	6
§1.3 Optical Microsphere/cylinder Research in China	7
§1.4 Configuration of this Thesis	7
<b>Chaper 2 Theoretical Analysis of Micro-cavity and Tapered Fiber</b>	<b>9</b>
§2.1 Theory and Characteristics of the Microsphere Resonance	9
§2.1.1 Fields of the Microsphere	10
§2.1.2 Characteristic Equations of the Microsphere	12
§2.1.3 Basic parameters of the Microsphere	13
§2.2 Theoretical Analysis of Microcylinder	18
§2.3 Propagation characteristics of Biconical Tapered Fibers	19
§2.3.1 Characteristics of Fibers	19
§2.3.2 Fields of the Single-mode Weak-waveguides Fiber	20
§2.3.3 Fields of Tapered Fiber	21
§2.4 Summary	22
<b>Chapter 3 Thoery of the Micro-cavity Resonance coupled by Biconical Tapered Fibers</b>	<b>23</b>
§3.1 Quality Factors of the Coupling System	23
§3.2 Analysis of the Biconical Tapered Fibers and the Micro-cavity RESONANCE Coupling System	25
§3.2.1 Coupling Analysis of the System	25
§3.2.2 Parameters of the Coupling System	28
§3.3 Summary	31
<b>Chapter 4 Fabrication of the Tapered Fiber and Micro-cavity</b>	<b>33</b>
§4.1 Fabrication of the Tapered Fiber	33
§4.1.1 Option of the Method of Melt-drawn Tapered Fiber	33
§4.1.2 Configuration and Control of the CO <sub>2</sub> Laser Melt-drawn System	34

§4.1.3 Operations and Results of the Experiment.....	36
<b>§4.2 Fabrication of the Microspere/cylinder .....</b>	<b>38</b>
§4.2.1 Comparison of Fabrication Methods .....	38
§4.2.2 Fabrication of Microspheres .....	39
§4.2.3 Fabrication of Microcylinders.....	44
<b>§4.3 Summary .....</b>	<b>45</b>
<b>Chapter 5 Structural Resonances in the Absorption Spectrum of</b>	
<b>Micro-cavities coupled by Tapered Fiber.....</b>	<b>45</b>
<b>§5.1 Structural Resonances in the Absorption Spectrum of Quartz Microsphere</b>	
<b>.....</b>	<b>45</b>
§5.1.1 Configuration .....	45
§5.1.2 Results and Analysis .....	48
<b>§5.2 Structural Resonances in the Absorption Spectrum of Er<sup>3+</sup>-doped</b>	
<b>Phosphate Microsphere .....</b>	<b>50</b>
§5.2.1 Characteristics of Er <sup>3+</sup> -doped Phosphate Glass .....	50
§5.2.2 Spectrum Characteristics of Er <sup>3+</sup> -doped Phosphate Microsphere.....	53
<b>§5.3 Structural Resonances in the Absorption Spectrum of Quartz</b>	
<b>Microcylinder .....</b>	<b>59</b>
<b>§5.4 Summary .....</b>	<b>63</b>
<b>Chapter 6 Conclusion and Research Plan .....</b>	<b>64</b>
<b>§6.1 Conclusion .....</b>	<b>64</b>
§6.1.1 Innovation of this Thesis.....	65
<b>§6.2 Research Plan.....</b>	<b>66</b>
<b>Reference .....</b>	<b>67</b>
<b>Published Papers .....</b>	<b>72</b>
<b>Awards .....</b>	<b>73</b>
<b>Acknowledgment.....</b>	<b>74</b>

## 第一章 绪论

光子学微结构(Photonics Microstructure)是指这样的一类光子材料与器件,它是在均匀的光学材料中,采用各种方法,引入折射率的调制与突变,其调制的周期或突变区的尺度在光波波长尺寸的量级。光子学微结构与电子学(或半导体)微结构相似,它既是材料,又是器件的心脏。电子学微结构是近三十年来微电子与光电子物理研究的最大热点,并已创造了一批重要的新型微电子和光电子器件,对信息科学技术的发展起到了巨大的推动作用。同样地,光子学微结构的研究也将对信息科学技术的发展起巨大的推动作用<sup>[1]</sup>。

近年来,光子学微结构中的柱/碟、环/线、球等几何微腔(如图 1.1)已在微腔激光器件和光谱技术应用中取得重大进展<sup>[2]</sup>。目前光学球微腔主要使用的介电材料有二氧化硅,氟化物,磷酸盐等光学玻璃基质,为取得高折射率可以掺杂一定比例的 Ti、Ba 等元素的氧化物,为了获得较强的增益可以掺杂 Yb、Er、Nd 等稀土元素,为了研究非线性效应可以使用非线性 Kerr 介质等等。

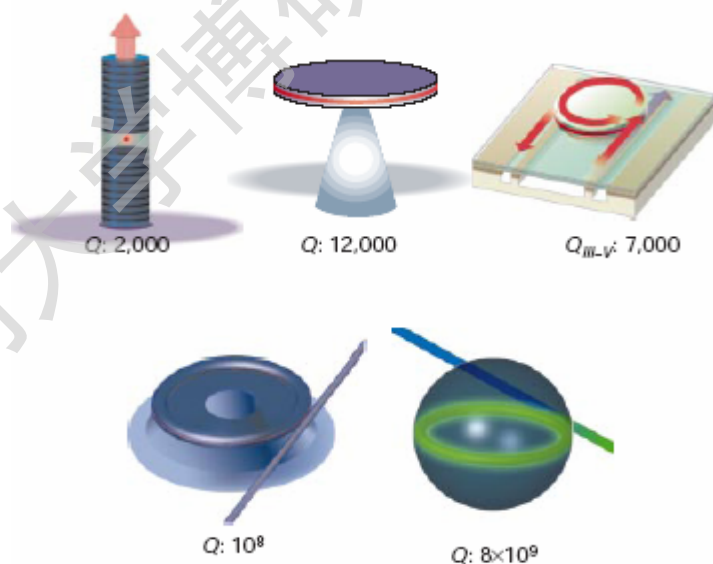


图 1.1 几种几何微腔<sup>[3]</sup>

在各式各样的微腔中,微球独特的球对称性使其具有进行精确的理论计算的可能。这些计算不仅是数值的,在相当大的程度上也是解析的。精确的理论可以和实验进行细致的对比,并且由解析解的形式也能进行清晰的解释。正像量子力

学以氢原子入手进行研究一样，球形微腔也被看作微腔研究的开放系统模型。而柱形微腔则具有制备方法简便、操作灵活和耦合范围广等优点，以及其在腔量子电动力学激光发射中的应用，也成为我们研究的对象。

球、柱微腔的光学特性来源于其独特的回廊模(*whispering gallery mode*,简称WGM 或 WG 模式): 即指耦合进入微腔内的光波在微腔内表面不断进行全反射, 从而被约束在腔内并沿赤道面上的大圆绕行(如图 1.2)。当满足相位匹配条件, 光程等于波长的整数倍, 则形成驻波, 即相当于在一个闭合的谐振腔内振荡。所产生的等间距分立的共振模, 称为回廊模(WGM)。由于共振的本征频率与入射场的模式无关, 只决定于球的折射率与半径, 因此这种共振也称为形貌共振(MDR)。这些分立的模式称为球微腔的本征模式, 对应的频率称为本征频率。而腔外的光场为局限于腔表面附近的消逝波(*evanescent wave*), 因此从腔内透出到腔外的平均能流为零。这就使回廊模下的微腔具有极高的品质因数和极小的模式体积。因此, 具有较高效率的耦合方式是通过其它电介质物体产生的消逝波耦合, 即近场耦合。

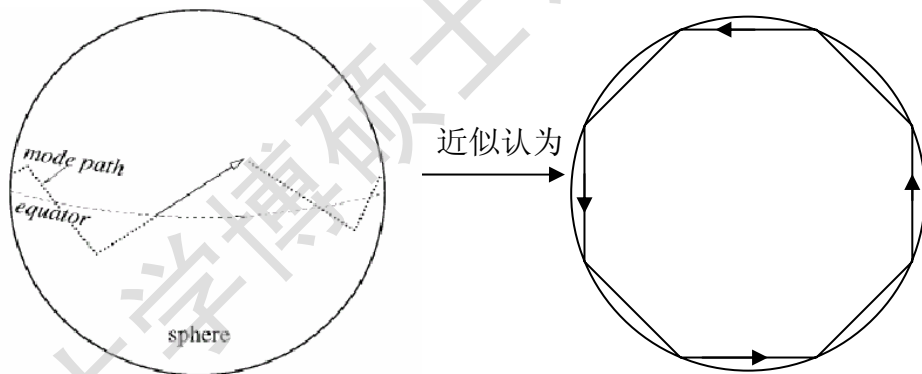


图1.2 回廊模路径示意图

本文主要研究了球形和柱形两种微腔的回廊模特性, 先对微腔的谐振理论进行了分析, 制备了用于实验的球、柱微腔和熔锥耦合光纤, 然后进一步实验研究了微腔耦合体系的回廊模吸收共振现象。下面首先对微腔及其耦合体系的研究历史进行了简要回顾:

## § 1.1 微腔及其耦合体系的研究历史

对介电球微腔模式的理论分析开始的很早。在 20 世纪初, G. Mie 等人就已



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库